



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## VLIV SAMOBUZENÉHO KMITÁNÍ NA PRACOVNÍ PŘESNOST OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

INFLUENCE OF CHATTER ON PRECISION OF MACHINE TOOLS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Tomeček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dominik Hermanský

BRNO 2018



## ZADÁNÍ VŠKP 1

## ZADÁNÍ VŠKP 2

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá vznikem samobuzeného kmitání při obrábění a jeho vlivem na kvalitu obrobeného povrchu. Dále se v práci uvádí způsoby, jakými se potlačuje vznik samobuzeného chvění v obráběcích strojích. Nakonec jsou tyto způsoby porovnány.

## **ABSTRACT**

These work is about origin of chatter during the machining and its influence on quality of machining surface. In work are listed ways of chatter suppression during machining. Finally, these ways are compared.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Samobuzené kmity, regenerativní princip, polohová vazba, tlumení samobuzených kmitů

## **KEYWORDS**

Chatter, regenerative effect, couple mode, suppression of chatter



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TOMEČEK, O. *Vliv samobuzeného kmitání na pracovní přesnost obráběcích strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Dominik Hermanský.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych především poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu ing. Dominiku Hermanskému za cenné rady a připomínky týkající se zpracování této práce.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana ing. Dominika Hermanského a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. 5. 2018

.....

Tomeček Ondřej



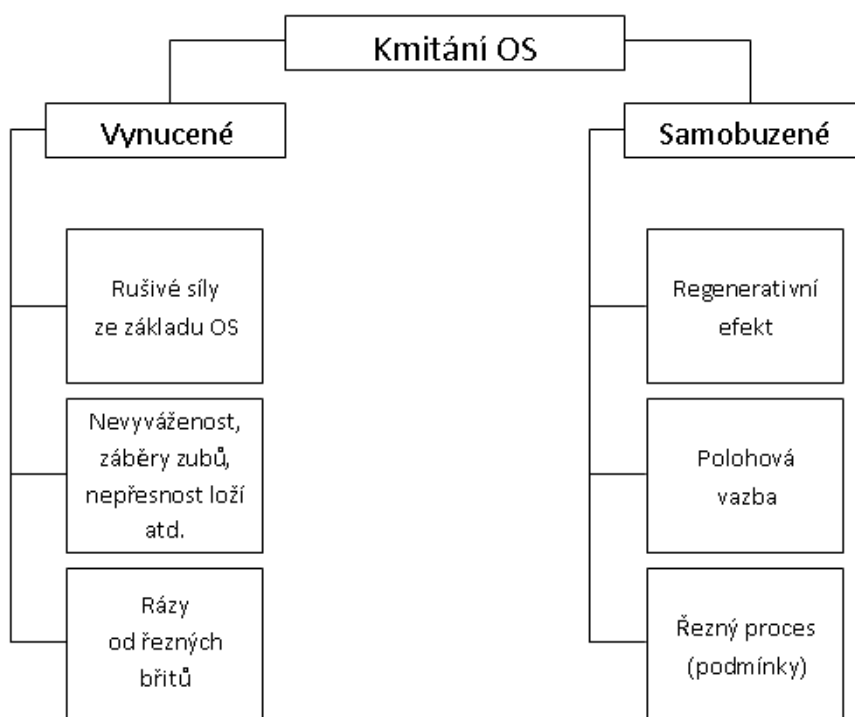
# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>ŠKODLIVOST SAMOBUZENÉHO KMITÁNÍ .....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>PRINCIP VZNIKU SAMOBUZENÝCH KMITŮ.....</b>	<b>15</b>
3.1	Regenerativní efekt .....	15
3.2	Princip polohové vazby .....	16
<b>4</b>	<b>MEZNÍ ŠÍŘKA TŘÍSKY A DIAGRAM STABILITY.....</b>	<b>20</b>
4.1	Mezní šířka třísky .....	20
4.2	Diagram stability.....	21
<b>5</b>	<b>TLUMENÍ SAMOBUZENÝCH KMITŮ .....</b>	<b>23</b>
5.1	Vliv řezných podmínek.....	23
5.2	Zvýšení tuhosti stroje.....	24
5.3	Pasivní tlumení .....	26
5.3.1	Hydraulický držák nástrojů .....	26
5.3.2	Tlumení vyvrtávací tyče .....	27
5.4	Aktivní tlumení.....	28
5.4.1	Heidenain Dynamická výkonnost.....	28
5.4.2	Magnetické ložisko.....	29
5.4.3	Tlumení pomocí piezoaktuátorů .....	30
5.4.4	Okuma Machining Navi systém .....	30
<b>6</b>	<b>ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR .....</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>34</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>37</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM SYMBOLŮ.....</b>	<b>39</b>

# 1 ÚVOD

Při práci obráběcího stroje vzniká kmitání vlivem rotujících částí stroje a také díky samotnému procesu obrábění. Kmitání obráběcích strojů je složitým problémem, protože se jedná o soustavu mnoha kmitajících a navzájem vázaných součástí. Toto nežádoucí kmitání je zdrojem hluku a nepřesnosti obrábění. Dělí se na vynucené a samobuzené viz. obrázek 1. Vynucené kmitání je způsobeno vlastnostmi stroje, rušivými silami ze základu stroje a samotným obráběním. Do vlastností stroje způsobujících chvění se řadí nevyváženost rotujících částí, jako jsou hřídele, ozubená kola, rotory motorů apod. Dále setrvačné síly od pohybujících se součástí, které vykonávají ať už zmíněný rotační pohyb nebo pohyb přímočarý. Sem se řadí například pohyby saní a smýkadel. Dalšími faktory způsobujícími chvění jsou nepřesnosti převodových mechanismů nebo nevyváženost rotačních částí.

Samobuzené kmitání je vyvoláno samotným řezným procesem. Jde o kmitající soustavu stroje, nástroje a obrobku. Toto kmitání nastává pouze za určitých řezných podmínek a změnou jejich nastavení lze řezný proces stabilizovat a předejít tak nežádoucím důsledkům rozkmitání soustavy, jež mají za následek nízkou kvalitu obrobku a při delším chodu stroje v režimu kmitání může dojít ke zničení nástroje nebo i poškození samotného stroje. Z tohoto důvodu nelze využívat plného výkonu strojů a proto je samobuzené kmitání velkou překážkou při dosahování maximální produktivity výroby. Samobuzené kmitání je v současnosti vysvětlováno několika teoriemi a stále je předmětem dalšího zkoumání. [1] [2]



Obrázek 1: Rozdělení kmitání obráběcích strojů [1]

## 2 ŠKODLIVOST SAMOBUZENÉHO KMITÁNÍ

Škodlivost samobuzeného kmitání spočívá hlavně ve dvou důvodech. Prvním z nich je zvýšené namáhání stroje i nástroje. V rozkmitaném dynamickém systému působí mnohem větší zatěžující síly než je přípustné, a proto se musí omezit maximální použitý výkon stroje. Toto omezení výkonu podstatně prodlužuje strojní čas, a tedy snižuje produktivitu výroby, což je pro výrobce značně neekonomické. Při plném výkonu stroje a neustále probíhajícím kmitáním může dojít k poškození nebo až zničení nástroje nebo stroje. [3]

Druhým důvodem je velké ovlivnění kvality obrobeneho povrchu. Rozkmitaný nástroj vytváří při obrábění zvlněný povrch. Tento povrch potom neodpovídá rozměrovým ani geometrickým tolerancím. Samobuzené kmitání má tedy velmi negativní vliv na pracovní přesnost obráběcích strojů viz. obrázek 2. [3]



Obrázek 2: Ukázka povrchu obrobeneho rozkmitaným nástrojem a povrchu obrobeneho stabilním nástrojem [4]

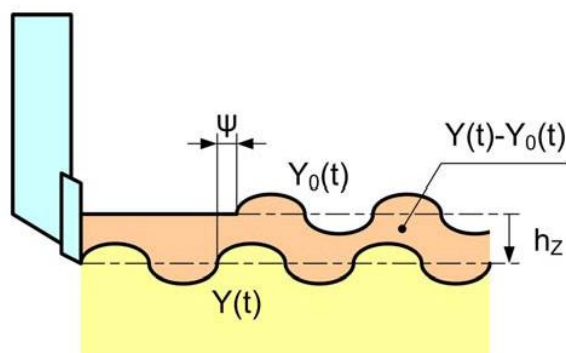
## 3 PRINCIP VZNIKU SAMOBUZENÝCH KMITŮ

Vznik samobuzeného kmitání u obráběcích strojů se vysvětluje dvěma hlavními principy. Principem regenerativního efektu a principem polohové vazby.

### 3.1 Regenerativní efekt

Při obrábění kmitajícím nástrojem vzniká zvlněný obrobeneý povrch. Při dalším obrábění už se obrábí zvlněný povrch viz. obrázek 3. Kmity při odebírání těchto třísek jsou vzájemně fázově posunuty. Tento fázový posun  $\psi$  mezi vlnitostí povrchu  $Y_0(t)$  a kmity nástroje  $Y(t)$  způsobuje, že nástroj odebírá třísku s měnící se tloušťkou  $Y(t) - Y_0(t)$ . Řezná síla je tímto modulována a celý systém se rozkmitá.

Kdyby mezi vlnitostí obrobeného povrchu a kmity nástroje nebyl fázový posun, nástroj by odebíral materiál stále stejné tloušťky  $h_z$  a nevznikalo by tak samobuzené kmitání. [3] [5]

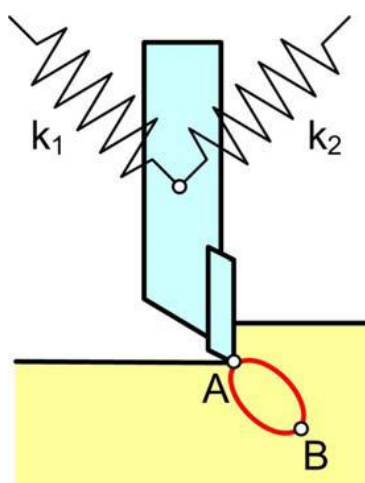


Obrázek 3: Princip regenerativního efektu [5]

### 3.2 Princip polohové vazby

Podle principu polohové vazby se nástroj pohybuje rovnoměrnou řeznou rychlostí a zároveň také kmitá ve dvou na sebe kolmých směrech. Superpozicí těchto pohybů vzniká pohyb po elipse. Když nástroj vykonává pohyb z bodu A do bodu B po směru hodinových ručiček, působí řezná síla proti jeho pohybu a energie systému se spotřebovává. Naopak při pohybu z bodu B do bodu A, po druhé části elipsy, působí řezná síla ve směru pohybu nástroje a vykonaná práce zvyšuje energii soustavy. Druhá část pohybu z bodu B do bodu A probíhá ve větší hloubce pod obráběným povrchem než pohyb z bodu A do bodu B. Řezná síla je tedy větší na trase z B do A a tedy i práce touto silou vykonaná je větší než práce na trase z bodu A do bodu B. Když se tato energie daná rozdílem dvou prací nestačí spotřebovat tlumením, dochází k nárůstu amplitudy kmitů a řezný proces se stává nestabilním, tj. dochází k samobuzenému kmitání.

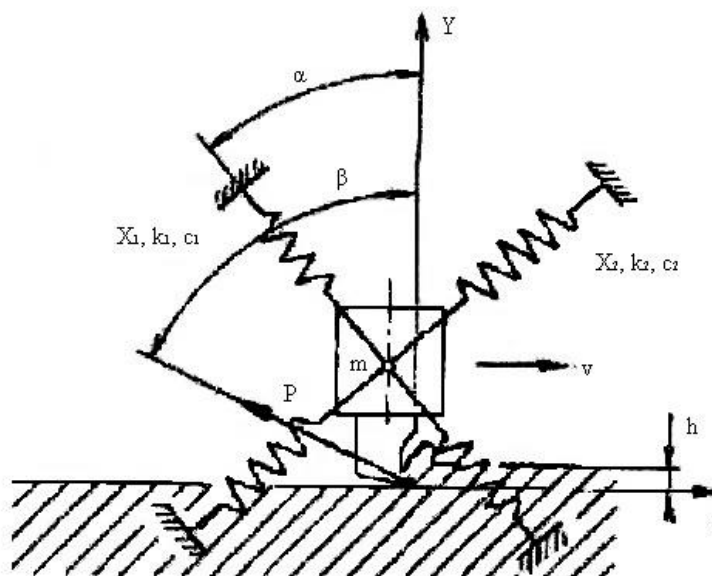
Kdyby proces probíhal v opačném směru, byla by energie spotřebovaná řeznou silou větší než energie dodaná a kmitavému pohybu by tedy byla energie odebírána. [3] [5]



Obrázek 4: Princip polohové vazby [5]



Mějme tedy hmotu  $m$  tohoto systému vázanou na dvě pružiny o tuhostech  $k_1$  a  $k_2$ , konstanty jejich útlumu označme  $c_1$  a  $c_2$ . Tyto pružiny leží ve směrech  $X_1$  a  $X_2$  na sebe navzájem kolmých. Uspořádání systému viz obrázek 5. Obrobek považujeme za dokonale tuhý. Přímka procházející břitem nástroje kolmo k obráběnému povrchu je označena  $Y$ . Řezná síla  $P$  působící na nástroj (a tedy na hmotu kmitajícího systému) je odkloněna o úhel  $\beta$  od osy  $Y$  a tento úhel předpokládáme konstantní. Nástroj se pohybuje rovnoměrnou rychlostí  $v$ . [3]



Obrázek 5: Princip polohové vazby [3]

Vyšetřovaný kmitavý pohyb je superponovaný na rovnoměrný pohyb rychlostí  $v$ . Hloubka nástroje pod obráběným povrchem  $h$  odpovídá stabilnímu obrábění. Této střední poloze nástroje odpovídá velikost řezné síly  $P_{stř}$ . Jestliže se poloha těžiště (nástroje) změní o hodnotu  $y$ , zmenší se velikost řezné síly o  $\Delta P$  na hodnotu  $P$ . [3]

Tedy

$$P = P_{stř} + \Delta P. \quad (1)$$

Změna řezné síly je úměrná velikosti výchylky  $y$  s hloubkovým koeficientem  $r$  řezné síly. Dostáváme

$$\Delta P = -r \cdot y, \quad (2)$$

$$P = P_{stř} - ry. \quad (3)$$

Pohyb systému je popsán vzhledem k osám  $X_1$  a  $X_2$  souřadnicemi  $x_1$  a  $x_2$ . Řezná síla se stanoví jako funkce výchylky ve směru osy  $Y$ . Takže

$$y = x_1 \cos \alpha - x_2 \sin \alpha, \quad (4)$$

$$P = P_{stř} - r x_1 \cos \alpha + r x_2 \sin \alpha. \quad (5)$$

Pohybové rovnice pro směry  $x_1$  a  $x_2$

$$m \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = P_{stř} \cos(\beta - \alpha) - r x_2 \cos \alpha \cos(\beta - \alpha) + r x_2 \sin \alpha \cos(\beta - \alpha), \quad (6)$$

$$m \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = P_{stř} \sin(\beta - \alpha) - r x_1 \cos \alpha \sin(\beta - \alpha) + r x_2 \sin \alpha \sin(\beta - \alpha). \quad (7)$$

Konstantní sílu  $P_{stř}$  na pravé straně rovnic, která neovlivňuje kmitání systému, vynecháme a dále upravujeme

$$m \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + [k_1 + r \cos \alpha \cos(\beta - \alpha)] \cdot x_1 - r \sin \alpha \cos(\beta - \alpha) x_2 = 0, \quad (8)$$

$$m \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + [k_2 - r \sin \alpha \sin(\beta - \alpha)] \cdot x_2 + r \cos \alpha \sin(\beta - \alpha) x_1 = 0. \quad (9)$$

Je vidět, že v rovnici pro směr  $X_1$  je člen závislý také na souřadnici  $x_2$  ve směru  $X_2$ . Podobně v druhé rovnici. Oba stupně volnosti jsou navzájem provázány svými polohami, proto se tento princip nazývá principem polohové vazby. [3]

Řešení systému rovnic (8) a (9) se provede návrhem řešení tvaru

$$x_1 = \xi_1 \cdot e^{st}, \quad (10)$$

$$x_2 = \xi_2 \cdot e^{st} \quad (11)$$

a dosadíme do systému rovnic (8) a (9). Dostaneme

$$[ms^2 + c_1 s + k_1 + r \cos \alpha \cos(\beta - \alpha)] \xi_1 - r \sin \alpha \cos(\beta - \alpha) \cdot \xi_2 = 0, \quad (12)$$

$$[ms^2 + c_2 s + k_2 - r \sin \alpha \sin(\beta - \alpha)] \xi_2 + r \cos \alpha \sin(\beta - \alpha) \cdot \xi_1 = 0. \quad (13)$$

Systém homogenních rovnic (12) a (13) pro  $\xi_1$  a  $\xi_2$ , má nenulové řešení, právě když determinant soustavy je roven nule. Tedy

$$\begin{vmatrix} ms^2 + c_1 s + k_1 + r \cos \alpha \cos(\beta - \alpha) & -r \sin \alpha \cos(\beta - \alpha) \\ r \cos \alpha \sin(\beta - \alpha) & ms^2 + c_2 s + k_2 - r \sin \alpha \sin(\beta - \alpha) \end{vmatrix} = 0 \quad (14)$$

Odtud dostaneme charakteristickou rovnici čtvrtého stupně vzhledem k  $s$ , která bude mít čtyři kořeny, které mohou být buď všechny čtyři reálné, nebo dva reálné a dva komplexní sdružené, a nebo dvě dvojice komplexních sdružených kořenů. [3]

Dosazením těchto kořenů do (10) a (11) dostaneme řešení (8) a (9) ve tvaru

$$x_1 = C_1 \cdot e^{s_1 t} + C_2 \cdot e^{s_2 t} + C_3 \cdot e^{s_3 t} + C_4 \cdot e^{s_4 t}, \quad (15)$$

$$x_2 = D_1 \cdot e^{s_1 t} + D_2 \cdot e^{s_2 t} + D_3 \cdot e^{s_3 t} + D_4 \cdot e^{s_4 t}. \quad (16)$$

Členy řešení (15), (16), do kterých se dosadí reálné kořeny, představují výchylky exponenciálně klesající pro  $s < 0$  a rostoucí pro  $s > 0$ . Jedná se tedy o nekmitavý pohyb stabilní nebo nestabilní. [3]

Komplexní kořeny ve tvaru

$$s_{12} = \lambda_1 \pm j\omega_1, \quad (17)$$

$$s_{34} = \lambda_2 \pm j\omega_2, \quad (18)$$

představují kmitavý pohyb s úhlovou frekvencí  $\omega$  s klesající amplitudou pro  $\lambda < 0$  a s rostoucí amplitudou pro  $\lambda > 0$ . Kmity s klesající amplitudou představují tlumené kmity a tedy případ dynamicky stabilní. Druhý případ kmitů, s rostoucí amplitudou kmitů, představuje samobuzené kmity a tedy dynamicky nestabilní případ. [3]

Samobuzené kmitání je tedy dáno kořeny (17) pro  $\lambda_1 > 0$ . Rovnicím (8) a (9) vyhovuje i částečné řešení

$$x_1 = C_1 \cdot e^{s_1 t} + C_2 \cdot e^{s_2 t}, \quad (19)$$

$$x_2 = D_1 \cdot e^{s_1 t} + D_2 \cdot e^{s_2 t}. \quad (20)$$

Toto řešení lze také přepsat do tvaru

$$x_1 = e^{\lambda_1 t} A_1 \sin \omega_1 t, \quad (21)$$

$$x_2 = e^{\lambda_1 t} \xi A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi), \quad (22)$$

kde  $\xi$  je poměr amplitud kmitů  $x_1$  a  $x_2$

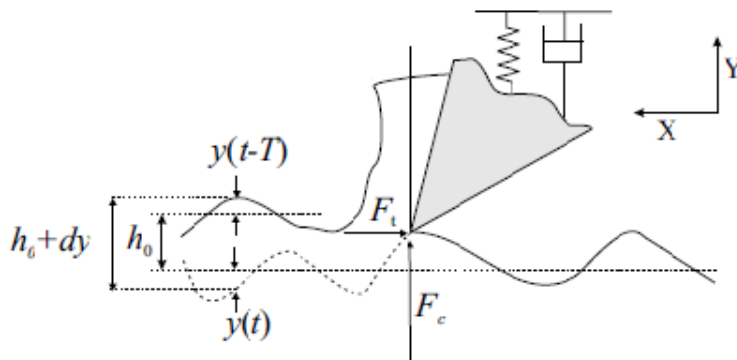
$$\xi = \frac{A_2}{A_1} \quad (23)$$

které narůstají se stejným exponentem  $\lambda_1$  a  $\varphi$  je konstantní fázový posun kmitů  $x_2$  za  $x_1$ , které mají frekvenci  $f = \omega/2\pi$ . Z rovnic (21) a (22) je patrný pohyb po zvětšující se elipse. [3]

## 4 MEZNÍ ŠÍŘKA TŘÍSKY A DIAGRAM STABILITY

### 4.1 Mezní šířka třísky

Mezní šířka třísky při obrábění je taková hodnota, při které je řezný proces na hranici stability. Vyšetřujeme uspořádání podle obrázku 6 ve směru osy  $Y$ .



Obrázek 6: Obrábění zvlněného povrchu [6]

Předpokládáme kmitání nástroje v ose  $Y$ . Dále  $y(t)$  jsou kmity nástroje,  $y(t-T)$  je vlnitost povrchu z předchozího obrábění a  $h_0$  je konstantní hloubka řezu při stabilním obrábění. Potom pro tloušťku třísky platí vztah

$$h(t) = h_0 + y(t - T) - y. \quad (24)$$

Pak pro složku  $F_c$  řezné síly platí

$$F_c(t) = K_f b [h_0 + y(t - T) - y], \quad (25)$$

kde  $K_f$  je řezný koeficient a  $b$  je šířka třísky. Dále můžeme psát pohybovou rovnici pro směr osy  $Y$  ve tvaru

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = K_f b [h_0 + y(t - T) - y]. \quad (26)$$

Rovnice (26) je diferenciální rovnice se zpožděním. Definujeme přenosovou funkci  $G(s)$  mezi silou  $F$  a posunutím  $y$ . Laplaceovou transformací  $y(t-T)=y(s)e^{-sT}$  dostáváme

$$\frac{h(s)}{h_0(s)} = \frac{1}{1 + K_f b G(s)(1 - e^{-sT})} \quad (27)$$

kde

$$G(s) = \frac{y(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (28)$$

Potom charakteristická rovnice systému je

$$1 + K_f b G(s)(1 - e^{-sT}) = 0 \quad (29)$$

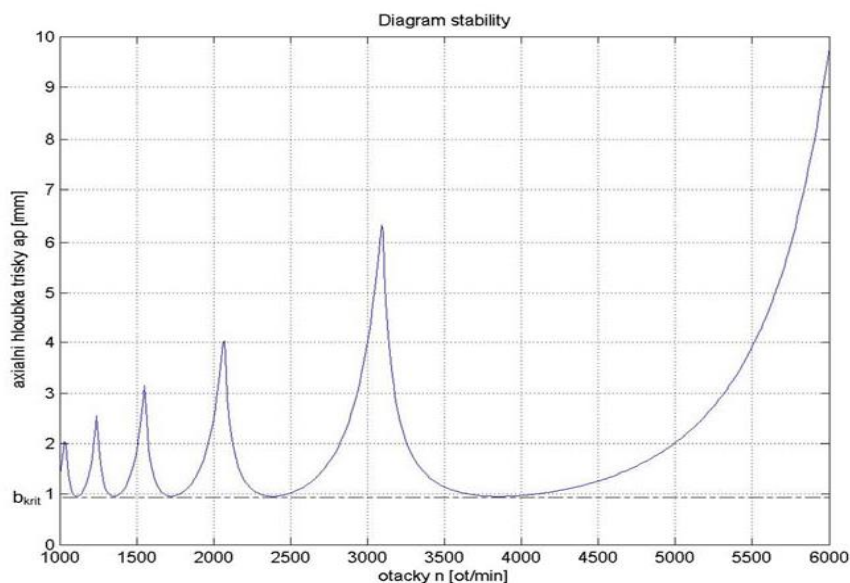
Substitucí  $s = j\omega$  a porovnáním reálných částí dostáváme limitní vztah pro šířku třísky

$$b_{krit} = \frac{-1}{2 K_f G(\omega)} \quad (30)$$

[5] [6].

## 4.2 Diagram stability

Graf závislosti šířky třísky na otáčkách vřetene se nazývá diagram stability, obrázek 7. Tento diagram se skládá z částí mezních křivek stability a slouží k nastavení vhodných řezných podmínek pro maximální využití výkonu stroje.

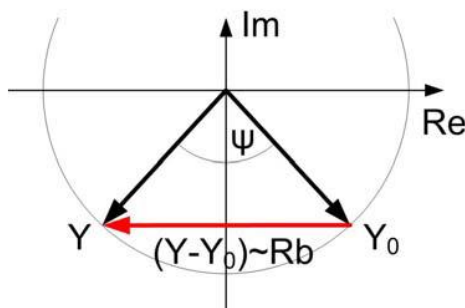


Obrázek 7: Ukázka diagramu stability [5]

Prostor pod křivkami charakterizuje soubor řezných podmínek, při kterých je obráběcí proces stabilní. Oblast nad křivkami představuje taková nastavení šířky třísky a otáček, při kterých je řezný proces nestabilní a tedy dochází ke vzniku samobuzených kmitů. Pro dosažení maximálního výkonu při hrubovacích operacích lze podle diagramu zvolit takové nastavení řezných podmínek, při kterých se bude odebírat větší šířka třísky než je kritická mezní šířka třísky a nedojde ke vzniku samobuzených kmitů. V případě vzniku těchto kmitů se právě podle diagramu určí, o jaké hodnoty snížit nebo zvýšit otáčky vřetene, nebo o jakou hodnotu změnit šířku třísky. [5] [6]

Diagram stability se získává z naměřených dat získaných při zkouškách na konkrétním stroji s upnutým konkrétním nástrojem. Naměří se amplitudo-fázové frekvenční charakteristiky (přenosová funkce  $G(s)$ ). Odtud se pro určitou frekvenci dají určit hodnoty

amplitudy a fázového posunutí. Pro hodnoty systému kmitajícího na mezi stability se amplituda a fázové posunutí vynesou do Gaussovy komplexní roviny a vzniká kruhový diagram, obrázek 8. [5] [6]



Obrázek 8: Kruhový diagram [5]

Z kruhového diagramu je možné odečíst fázové posunutí  $\psi$  zvlněného povrchu a kmitů nástroje, rozdíl vektorů  $Y_0$  a  $Y$ , který je úměrný součinu  $R \cdot b_{krit}$ . Určité frekvenci  $\omega$  odpovídá určitá hodnota součinu  $R \cdot b_{krit}$  a fázového posunutí  $\psi$ . Odtud se určí hodnota  $b_{krit}$  a přiřadí se jí odpovídající otáčky

$$n = \frac{60 f}{z \cdot \left( N + \frac{\psi}{2\pi} \right)} \quad (31)$$

kde  $z$  je počet zubů frézy a  $N$  je počet celých vln na povrchu obrobku mezi po sobě následujícími řezy ( $N=0,1,2,\dots$ ). Takto lze vykreslit  $N+1$  mezních křivek pro daný rozsah otáček. Diagram stability tvoří obálka těchto křivek. [5]

## 5 TLUMENÍ SAMOBUZENÝCH KMITŮ

Samobuzené kmity jsou velmi nežádoucím jevem v obrábění, a proto je nutné jim předcházet. Existuje řada způsobů, jak předejít vzniku samobuzeného kmitání a tím i poškození obrobku a nástroje. Jedním ze způsobů je volba vhodných řezných podmínek. Další způsoby je potřeba zohlednit již při samotném konstruování obráběcího stroje. Náchylnost stroje vůči vzniku kmitů lze omezit například zvýšením jeho statické a dynamické tuhosti vhodnou volbou geometrie a materiálů. Mezi další možnosti patří různé druhy pasivních či aktivních tlumičů. Mezi nejmodernější způsoby patří snímání vibrací nástroje, jejich vyhodnocování počítačem a následné řízení otáček vřetena.

### 5.1 Vliv řezných podmínek

Experimentálně byla testována různá nastavení řezných podmínek na vznik samobuzených kmitů. Při zkouškách se vždy obráběl povrch ještě nezvlněný předchozím obráběním, aby se zamezilo vzniku samobuzeného chvění vlivem regenerativního efektu. [3]

Nejvýraznějším faktorem na vznik chvění je nastavení šířky třísky  $b$  viz obrázek 9 a). Stejný účinek na vznik chvění má i hloubka řezu  $h$ . Na diagramu stability (obr.9 a) je vidět, jaká změna otáček stačí ke změně stability procesu. Tyto dvě veličiny nejvíc ovlivňují stabilitu řezného procesu, a čím větší jsou jejich hodnoty, tím větší je i nestabilita procesu. [3] [7]

Tloušťka třísky u frézování má vliv na stabilitu obrábění do tloušťky třísky 0,03 mm. Se zvětšováním tloušťky do této hodnoty má negativní vliv. Při hodnotě tloušťky třísky větší než 0,03 mm bylo zjištěno, že naopak stabilita procesu roste. S dalším zvětšováním tloušťky třísky se ale její vliv snižuje, viz obrázek 9 b). Vliv tloušťky třísky řádu 1 mm je téměř nulový. [3] [7]

Dalším zkoumaným a výrazným prvkem ovlivňujícím vznik kmitů je posuv  $s$  (na otáčku, na zdvih, na zub frézy). Zvětšení posuvu zvýšilo stabilitu procesu s výjimkou velmi malých posuvů na zub při frézování. Velikost účinku posuvu  $s$  je dána velikostí účinku příslušné tloušťky třísky  $a$ . [3]

Řezná rychlost má v oblasti rychlostí používaných pro nástroje ze slinutých karbidů pozitivní vliv na zvýšení stability řezného procesu, viz obrázek 9c). [3] [7]

Vliv úhlu nastavení  $\kappa$  na stabilitu obrábění je dán účinkem úhlu  $\zeta$ , viz obrázek 9 d). Úhel  $\zeta$  se měří mezi kolmicí  $Y$  k povrchu vytvářeného relativním řezným pohybem hlavního břitu nástroje a směrem  $X$  relativních kmitů mezi obrobkem a nástrojem. Vliv úhlu  $\zeta$  na stabilitu obrábění je pozitivní. Při obrábění s úhlem  $\zeta=90^\circ$  samobuzené kmity téměř nevznikají. Se zvětšováním úhlu  $\zeta$  roste stabilita obrábění. [3]

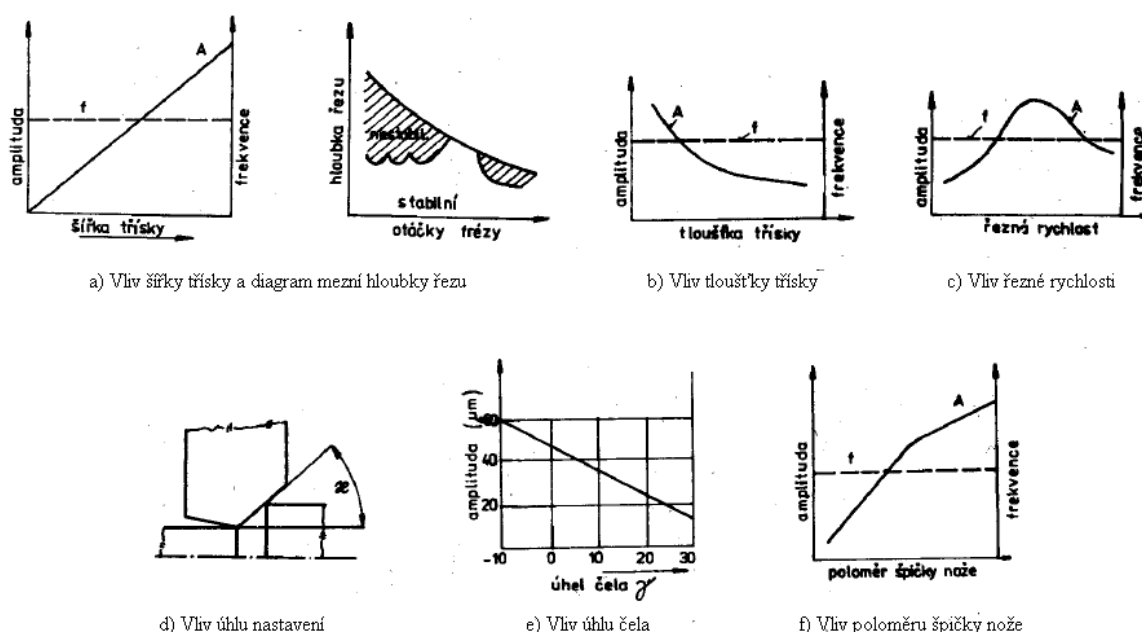
Vliv nastavení úhlu čela  $\gamma$  na stabilitu obrábění je pozitivní, viz obrázek 9e). Zvětšováním úhlu čela klesá intenzita kmitání, ale snižuje se trvanlivost řezného břitu. Vliv úhlu hřbetu  $\alpha$  na stabilitu obrábění je negativní a tento vliv klesá se zvětšováním úhlu hřbetu  $\alpha$ . Pro velikosti úhlu  $\alpha > 6^\circ$  je vliv na stabilitu prakticky nulový. [3] [7]

Poloměr zaoblení špičky nože má negativní vliv na stabilitu obrábění, viz obrázek 9 f). Se zvětšováním poloměru roste šířka třísky a zároveň se zmenšuje tloušťka třísky. [7]

Vliv nastavení nože nad nebo pod střed je dán vlivem odpovídajících skutečných hodnot úhlů  $\alpha$  a  $\gamma$ . [3]

Při frézování je vliv počtu zubů frézy, které zabírají současně, negativní na stabilitu obrábění. Proto je vzhledem ke vzniku samobuzeného kmitání lepší volit frézy s větší roztečí a menším počtem zubů. [3]

V praxi je tedy nutné upravovat parametry tak, aby se příliš neomezoval výkon stroje. Tedy např. volit větší posuvy při hrubovacích operacích nebo obrábět vyšší řeznou rychlostí. [3]



Obrázek 9: Přehled vlivů nastavení řezných podmínek na amplitudu samobuzených kmitů [7]

## 5.2 Zvýšení tuhosti stroje

Obráběcí stroj se při studiu kmitů posuzuje jako kmitající soustava s velkým počtem stupňů volnosti. Ukázalo se, že výrazných typů vlastních kmitů má stroj malý počet a obvykle jsou navzájem tyto frekvence dost vzdálené. Takže se stroj dá rozdělit podle těchto vlastních frekvencí na několik jednodušších kmitavých soustav. Samobuzené kmity stroje jsou hodně blízké některé z vlastních frekvencí některého systému obráběcího stroje. Tento systém se pak nazývá řídicí systém. Právě tento řídicí systém má potom největší vliv na vznik samobuzených kmitů. [3]

Tedy právě zvýšením tuhosti částí tohoto řídicího systému, které mají charakter pružiny, zvyšuje také odolnost stroje proti vzniku samobuzených kmitů. Takže např. u soustruhu zvýšením tuhosti hrotů, pinoly, koníka, vřetena, u frézky pro čelní frézování zvýšením tuhosti upnutí nástroje. [3]

Také použití předepnutých ložisek k uložení vřetene a předepnutých lineárních vedení pro pohybové osy vede ke zvýšení tuhosti. Také vyšší tuhost upnutí nástrojů, jejich držáků ve vřetenu, tužší upnutí obrobků vede ke zvýšení tuhosti celé kmitavé soustavy. [8]

Potlačení chvění se také dosahuje použitím minerálního kompozitu tzv. polymerbetonu k výrobě rámu stroje. Polymerbeton má řádově větší koeficient tlumení



**Obrázek 11: Uspořádání experimentu modální analýzy [11]**

Dalšího zvyšování dynamické stability obráběcího stroje lze dosáhnout použitím tlumičů vibrací. [7]

### 5.3 Pasivní tlumení

Pasivní tlumiče jsou založeny připojení vedlejší hmotné soustavy na tlumenou soustavu. Připojení vedlejší hmoty je obvykle přes pružný člen. Velikost tlumení závisí na nastavení takových hodnot tlumiče, jako je hmotnost nebo pružnost částí tlumicí soustavy. Jsou konstrukčně jednoduché, levné a mají malou poruchovost.

#### 5.3.1 Hydraulický držák nástrojů

Hydraulický držák nástrojů se vyznačuje schopností tlumení kmitů na bázi změny mechanické energie kmitů na tepelnou energii. Tenká vrstva hydraulické kapaliny mezi nástrojem a upínacím systémem funguje jako pružný tlumicí element k přeměně energie kmitů, viz obrázek 12 pozice 4 a 5. Výhodou tohoto upínacího systému je možnost upnutí nástrojů různých průměrů a vysoké tlumení kmitů. Nevýhoda je snížení statické tuhosti, které je ale narázno zvýšením dynamické stability systému. [13]



Obrázek 12: Řez hydraulickým držákem nástrojů [13]

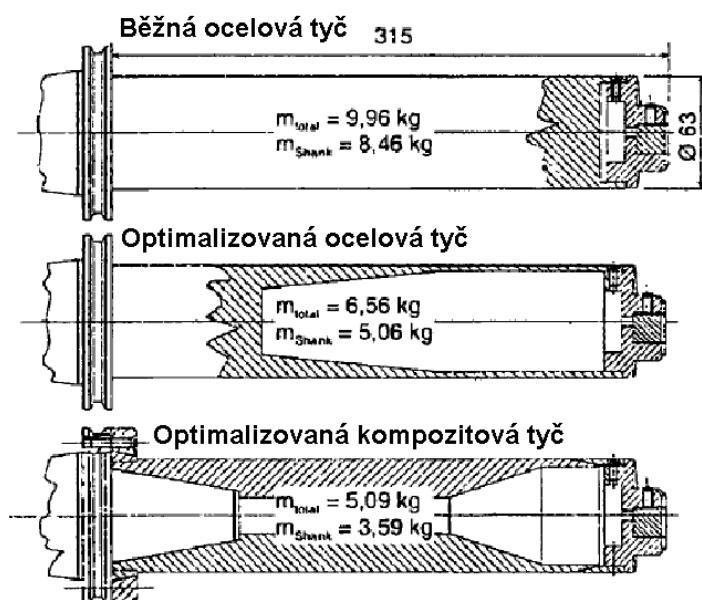
### 5.3.2 Tlumení vyvrtávací tyče

Dlouhé vyvrtávací tyče jsou náchylné k rozkmitání. Proto je pro zachování dobrých řezných podmínek nutné tyto kmity tlumit. To se děje přidáním tělesem velké hmotnosti, které je uloženo v pružných pryžových pouzdrech. Tlumičím efekt je zvýšen vyplnění zbytku tyče tlumicím olejem, viz obrázek 13. [8]



Obrázek 13: Schéma vyvrtávací tyče Sandvik [10]

Dalšími možnostmi jak předejít vibracím při obrábění je změna geometrie a také použitého materiálu. Na obrázku 14 je srovnání standardní vyvrtávací tyče vyrobené z oceli, optimalizované ocelové tyče, která má stejné rozměry, ale nižší hmotnost a tedy jiné vlastní frekvence kmitů. Třetí tyč je vyrobena z kompozitu a při zachování geometrických rozměrů má nejnižší hmotnost. [10]



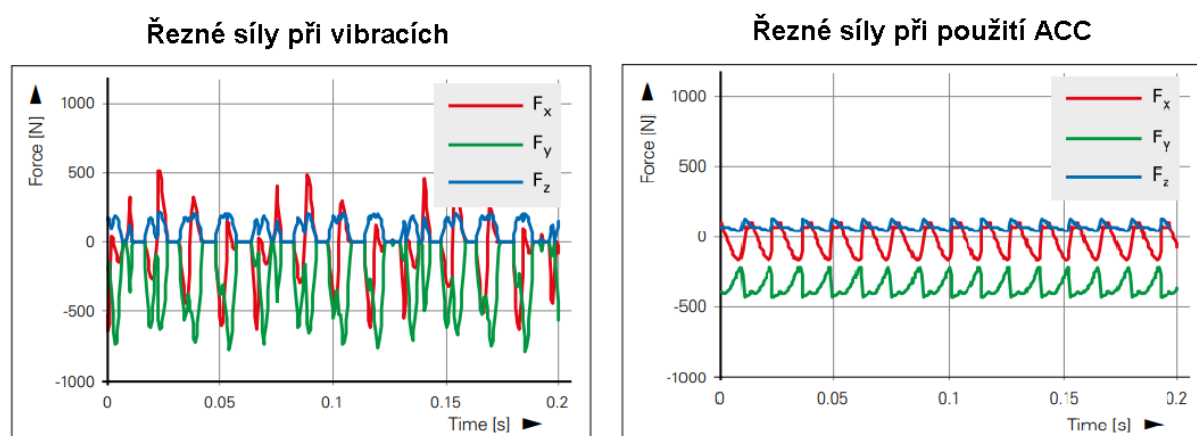
Obrázek 14: Srovnání vyvrtávacích tyčí [10]

## 5.4 Aktivní tlumení

Aktivní tlumicí systémy jsou založeny na změnách v obráběcím procesu během chodu stroje. Přizpůsobují míru tlumení aktuálním řezným podmínkám. Nejmodernější systémy jsou založeny na softwarovém vyhodnocování kmitů a regulaci otáček vřetena.

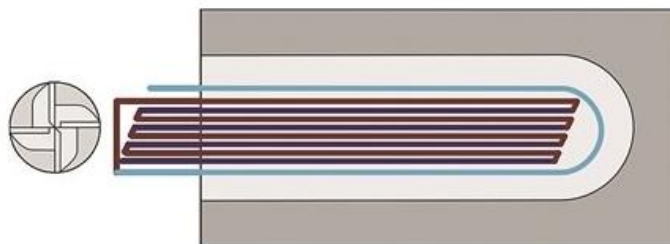
### 5.4.1 Heidenhain Dynamická výkonnost

Nejdůležitějším prvkem tohoto balíku firmy Heidenhain je funkce ACC – aktivní potlačení drnčení, která omezuje sklon stroje ke kmitům. Systém snímá a analyzuje chvění stroje. Pokud systém zaznamená nežádoucí chvění, snaží se pohltit jeho energii pomocí řízení lineárních os. Pohony stroje jsou tak využívány jako aktivní tlumiče vibrací. Na obrázku 15 je srovnání velikostí řezných sil s použitím systému ACC a bez jeho použití. Nevýhodou tohoto systému je možnost tlumit vibrace do frekvence 100 Hz. [8] [11]

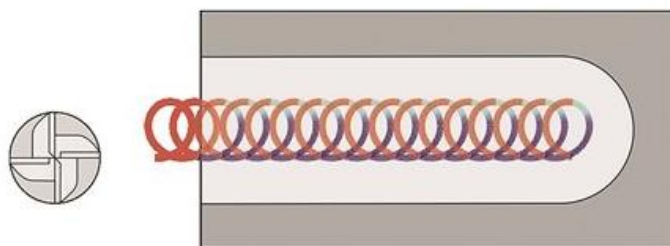


Obrázek 15: Srovnání řezných sil při použití ACC [11]

Další funkcí v balíku Dynamická výkonnost je trochoidální frézování. Tato funkce zohledňuje trasu nástroje při obrábění. Pro stabilitu řezného procesu je důležité, aby programem generovaná dráha nástroje byla volená tak, aby bylo zatížení nástroje konstantní a nedocházelo k náhlým změnám opásání nástroje, např. při frézování rohu kapsy, a tedy k náhlé změně řezné síly, která by mohla vybudit chvění. Trochoidální frézování vede ke snížení radiální hloubky řezu, tedy ke snížení tloušťky třísky. Menší hloubka třísky umožňuje zvýšení hodnot posuvu. Kratší doba kontaktu mezi břitem nástroje a obrobkem znamená menší buzení řezným procesem a dovoluje zvětšit hloubku řezu tak, aby se nevybudilo kmitání. [8]



Klasická metoda řádkového obrábění na 4 plné řezy a 2 částečné řezy po určitých krocích v ose Z. Doba obrábění je 96 s.



Trochoidální metoda s použitím AFC. Doba obrábění je v druhém případě 58 s. Při použití stejného nástroje a při obrábění stejného materiálu došlo ke snížení doby obrábění o 40 %. Rozměry drážky: délka 63 mm, šířka  $1,5D$  a hloubka  $1,9D$ , kde  $D$  je průměr nástroje.

Obrázek 16: Srovnání běžné dráhy nástroje a trochoidální dráhy nástroje [16]

#### 5.4.2 Magnetické ložisko

Aktivní tlumení pomocí magnetického ložiska je založeno na aplikování opačných dynamických sil o stejné frekvenci, jako jsou síly budící kmitání. Aplikování proměnlivé síly probíhá skrze elektromagnetické pole, takže nedochází ke vzniku třecích sil. Tyto ložiska mají dlouhou životnost a tichý chod. Jejich nevýhodou je vysoká energetická náročnost provozu. Vzhledem k jejich elektronickému řízení se používají v kombinaci s valivými ložisky kvůli bezpečnosti a zvýšení tuhosti uložení. Toto řešení také snižuje energetickou zátěž. [17] [18]

Magnetické ložisko se skládá z několika pólových dvojic, viz obrázek 17. Rotor je vybaven senzory polohy pro snímání otáček. Přesnost, s jakou magnetická ložiska ovlivní chod stroje, záleží právě na přesnosti a odezvě senzorů na rotoru.

Pomocí software je možné velmi dobře modulovat sílu v ložisku a potlačit tak vibrace rotoru. [17] [18]



Obrázek 17: Magnetické ložisko SKF [18]

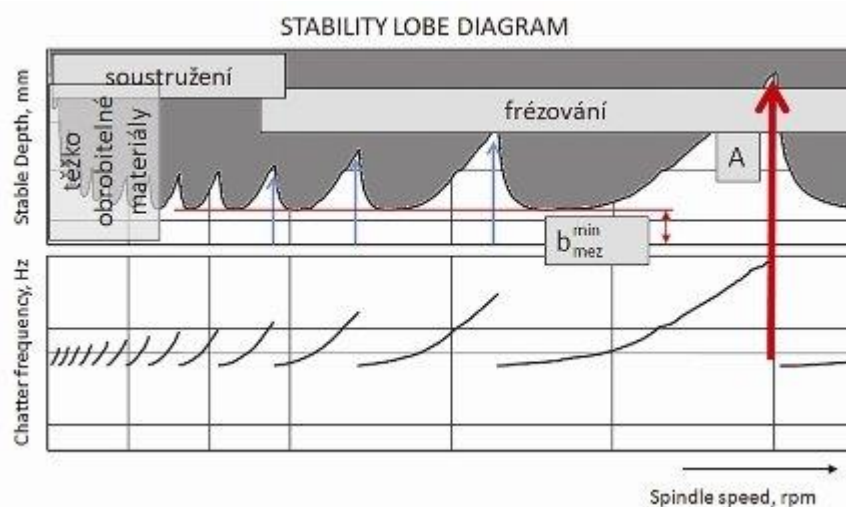
### 5.4.3 Tlumení pomocí piezoaktuátorů

Využívá se zde piezoelektrického jevu, který spočívá v tom, že při deformaci krystalů vzniká elektrický náboj. Jev funguje i obráceně. Při aplikaci elektrického pole se krystal deformuje. Odtud vyplývá, že aplikace síly není bezkontaktní jako v případě magnetického ložiska. Piezoaktuátory jsou schopné aplikovat velkou sílu na malou vzdálenost s velkou přesností. Jsou ovládány elektronicky a proto je lze tedy využít k modulaci síly působící na hřídel a tím tlumit kmitání. V mnoha aplikacích nelze působit přímo na hřídel. V takových případech se tedy tlumicí síla aplikuje na ložiska. [17]

### 5.4.4 Okuma Machining Navi systém

Japonská společnost Okuma nabízí ke svým strojům antivibrační systém Machining Navi. Navi M-g pro frézovací operace, který ovládá operátor stroje ručně nebo automaticky pracující verze pro frézování Navi M-i. Verze programu pro soustružení se nazývá Navi L-g. Výhodou Machining Navi je, že nepotřebuje žádná zdlouhavá a nákladná měření dynamických vlastností stroje a nástroje. Navi má vlastní jednoduché měřicí zařízení, které snímá vibrace přímo při obrábění. [19]

Řezný proces je stabilní v bílé oblasti diagramu stability. Řadě optimálních otáček odpovídají špičky označené šipkami, viz obrázek 18. [19]



Obrázek 18: Diagram stability s vyznačenými optimálními otáčkami [19]

Program Navi vypočítá otáčky podle následujícího vzorce

$$n = \frac{60 f}{z \cdot N} \quad (32)$$

kde  $f$  je frekvence samobuzeného kmitání,  $z$  je počet zubů frézy a  $N$  je počet celých vln, které se vejdou do zubové mezery. Předpokládá se, že aktuální otáčky jsou zvoleny v programu jen podle kombinace nástroje a materiálu obrobku, použije se taková hodnota optimálních otáček, která je nejbližší aktuálním otáčkám vřetena. Tato volba zajistí, že se nepřekročí maximální dovolená řezná rychlost. Axiální hloubka řezu se přitom nezmění. Takže probíhá-li řezný proces v nestabilní černé oblasti diagramu, tak optimální otáčky zajistí, že se proces dostane do některé špičky stabilní bílé oblasti diagramu. Díky této volbě se samobuzené chvění



utlumí. Jednotlivé špičky mají různou šířku i výšku. Největší špička je označena červenou šipkou. Této špičce odpovídá nejnižší  $N$  vypočtené podle

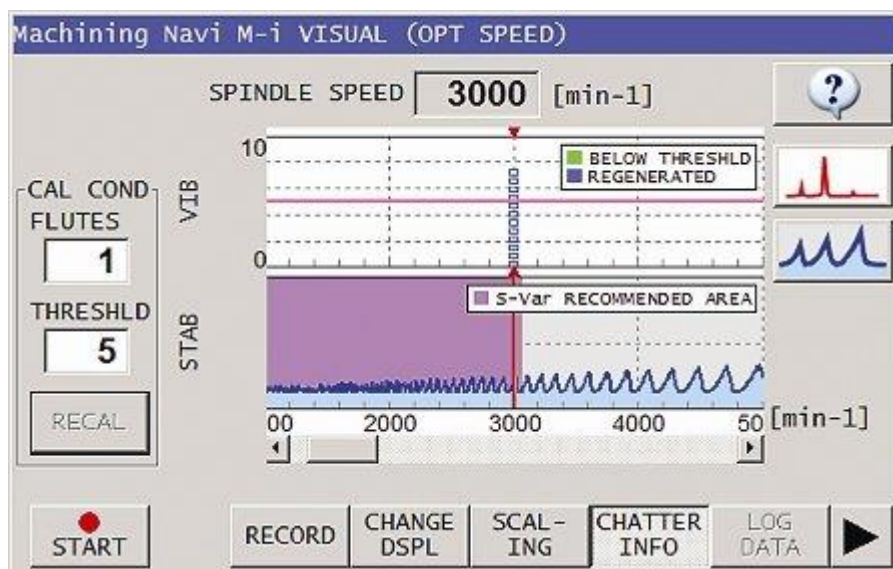
$$N + \psi = \frac{60 f}{z N} \quad (33)$$

Popsaný efekt stabilizace procesu obrábění teoreticky funguje i pro menší špičky, ale kvůli jejich menší šířce je pravděpodobnost, že se otáčky dostanou do stabilní oblasti, menší. [19]

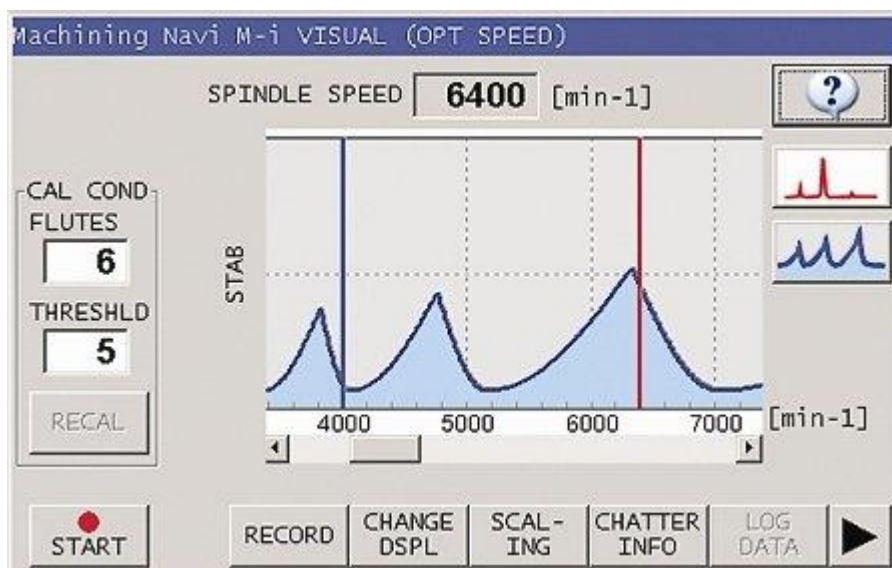
Pro výpočet optimálních otáček se musí do programu zadat počet zubů frézy, prahová hodnota vibrací. Když nejsou tyto parametry zadány, program je nastaví automaticky podle přednastavených tabulek. [19]

Nastavení hodnot parametrů popisuje následující odstavec a obrázky 19 a 20.

„Operátor spustí nejprve funkci Diagnostika vibrací. S pomocí zobrazeného spektra měřených vibrací stanoví prahovou hodnotu vibrací, od které bude program uvažovat špičky ve spektru při výpočtu optimálních otáček. Prahovou hodnotu lze později optimalizovat. Jestliže Diagnostika zjistí, že spektrum chvění obsahuje pouze jeden výrazný vrchol, tj. jednu frekvenci chvění, povolí program použít funkci „Vyhledání optimálních otáček automaticky z programu“ a chvění může být potlačeno změnou otáček. Existence jednoho spektrálního vrcholu je charakteristická pro samobuzené chvění, a pouze tehdy platí výše uvedený vztah pro optimální otáčky. Samobuzené chvění tak nemůže být zaměněno s vynucenými vibracemi, jejichž spektrum může obsahovat několik výrazných vrcholů. Hovoříme-li o jedné frekvenci ve spektru samobuzeného kmitání, máme na mysli spektrum vypočtené při jistých konstantních otáčkách nástroje. Při změně otáček se frekvence chvění může změnit, jak jsme ukázali na diagramu stability.“ [19]



Obrázek 19: Nastavení v programu Navi [19]



Obrázek 20: Diagram stability v programu Navi [19]



## 6 ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

Samobuzené kmitání vzniká u všech druhů obráběcích strojů s výjimkou obráběcích strojů s velmi malou třískou, jako jsou brusky, honovačky atd. Jeho velmi negativní vliv na kvalitu obrobeného povrchu jako i na zvětšené namáhání nástroje a posléze i samotného obráběcího stroje, vedou k tomu, že se tomuto jevu snažíme v praxi zcela předcházet. To však znamená snížení řezných podmínek a tím tedy i snížení výrobního výkonu stroje, tj. produktivity.

Zavedením celé řady opatření se dá samobuzeným kmitům předcházet a to s poměrně přijatelnými ztrátami na produktivitě výroby. Prvním ze způsobů jak tlumit jakékoliv vibrace je samozřejmě pasivní tlumení přidáním nějaké hmotnosti. Toto řešení je jednoduché a efektivní, avšak ne zcela univerzálně použitelné v mnoha situacích, kdy se řeší případ rotace s relativně vysokými otáčkami. Tento problém tedy z části řeší hydraulické tlumení držáku nástrojů.

Nejmodernějším trendem v oblasti tlumení kmitů je aktivní tlumení. Tento způsob spočívá v aplikaci modulovaných dynamických sil o stejné frekvenci, jako jsou budící síly samobuzených kmitů a touto aplikací se dynamické síly vyruší. Toto lze prakticky provést přímo v běhu řezného procesu buď použitím magnetických ložisek, která jsou velmi dobře elektronicky ovladatelná, nebo aplikací piezoaktuátorů. Tyto jsou taky velmi dobře elektronicky ovladatelné, ale jejich nevýhoda spočívá v kontaktu s poháněným prvkem. Navíc se z tohoto důvodu mohou také zničit deformací.

Úplně nejmodernějším způsobem aktivního tlumení kmitů je měření vibrací přímo na vřetenu a následné zpracování tohoto signálu speciálním softwarem Machining Navi. Tento program pak hodnotí vibrace měřené soustavy a reguluje otáčky vřetena takovým způsobem, aby byl dosažen, co největší výkon stroje. Tato metoda je asi zcela nejefektivnější vzhledem k finančním i konstrukčním nárokům. Další zdokonalování softwarového vybavení CNC strojů a jejich doplňků je způsob, jak maximálně zvýšit produktivitu výroby.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] **Marek, Jiří.** *Konstrukce CNC obráběcích strojů* . místo neznámé : MM Publishing , 2006. 12122572.
- [2] —. Všeobecně o vibracích v obráběcích strojích . *t-support*. [Online] 2013. [Citace: 21. 4 2018.] <https://www.t-support.cz/kat/vseobecne-o-vibracich-v-obrabecich-strojich-6>.
- [3] **Tlustý, Jiří.** *Samobuzené kmity v obráběcích strojích* . Praha : Nakladatelství československé akademie věd, 1954.
- [4] Dynamic Efficiency – Working Efficiently and with Process Reliability. *Heidenhain*. [Online] 2014. [Citace: 17. 5 2018.] [http://www.heidenhain.us/addl-materials/enews/stories\\_0614/main-mt.php](http://www.heidenhain.us/addl-materials/enews/stories_0614/main-mt.php).
- [5] **Fojtů, Petr.** Problematika samobuzeného kmitání při obrábění. [Online] [Citace: 21. 4 2018.] <http://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>.
- [6] **Ganguli, Abhijit.** *Universite Libre de Bruxelles*. [Online] 2005. [Citace: 22. 4 2018.] <http://scmero.ulb.ac.be/Publications/Thesis/Ganguli05.pdf>.
- [7] **Borský, Václav.** *Základy stavby obráběcích strojů*. Brno : VUT, 1991. 8021403616.
- [8] **Swaczyna, Zbyněk.** Návrh přeladitelného nástrojového držáku. [Online] 2015. [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63501/F2-DP-2015-Swaczyna-Zbynek-DP1719\\_SWACZYNA.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63501/F2-DP-2015-Swaczyna-Zbynek-DP1719_SWACZYNA.pdf?sequence=-1&isAllowed=y).
- [9] Beton a přírodní žula při výrobě loží a rámů obráběcích strojů. *MM Spektrum* . [Online] 2003 . [Citace: 20. 5 2018.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/beton-a-prirodni-zula-pri-vyrobe-lozi-a-ramu-obrabecich-stroju.html>.
- [10] TMMT. [Online] 2012. [Citace: 6. 5 2018.] <http://www.tmmt.com.cn/products01en/id/7.html>.
- [11] **Štětina, Josef.** Virtuální laboratoř. [Online] 2003. [Citace: 15. 5 2018.] <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/index.htm>.
- [12] **Stephenson, David.** *Metal Cutting Theory and Practice*. místo neznámé : CRC Press, 2016. 9781466587540.
- [13] Hydraulic Chucks - The latest Clamping Technology. *Cutwel*. [Online] [Citace: 22. 5 2018.] <https://www.cutwel.co.uk/tool-holding/spindle-tooling/wte-hydraulic-chucks>.
- [14] **Sørby, Knut.** Development and Optimization of Vibration-Damped Tool Holders for High Length-to-Diameter Boring Operations. [Online] 2016. [Citace: 21. 5 2018.]
- [15] **Heidenhain.** Dynamic Efficiency. [Online] 2013. [Citace: 6. 5 2018.] [https://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/1081192-20\\_Dynamic\\_Efficiency\\_en.pdf](https://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/1081192-20_Dynamic_Efficiency_en.pdf).
- [16] **Štědrý, Jan.** Výkonové frézování. [Online] *MM Spektrum* , 2014. [Citace: 21. 5 2018.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/vykonove-frezovani.html>.

- [17] **Škúci, Michal.** *AKTIVNÍ ŘÍZENÍ TLUMENÍ KMITÁNÍ*. Brno : VUT, 2011.
- [18] **Harris, Tim.** Magnetická ložiska SKF – od inovace k osvědčeným řešením. *Elektro*. [Online][Citace: 22. 5 2018.] <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/magneticka-loziska-skf-od-inovace-k-osvedcenym-resenim--13657>.
- [19] **Svoboda, Bach.** Adaptivní potlačování chvění při frézování. [Online] MM Spektrum, 2014. [Citace: 6. 5 2018.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/adaptivni-potlacovani-chveni-pri-frezovani.html>.



## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rozdělení kmitání obráběcích strojů .....	14
Obrázek 2: Ukázka povrchu obrobeného rozkmitaným nástrojem a povrchu obrobeného stabilním nástrojem .....	15
Obrázek 3: Princip regenerativního efektu .....	16
Obrázek 4: Princip polohové vazby .....	16
Obrázek 5: Princip polohové vazby .....	17
Obrázek 6: Obrábění zvlněného povrchu .....	20
Obrázek 7: Ukázka diagramu stability .....	21
Obrázek 8: Kruhový diagram .....	22
Obrázek 9: Přehled vlivů nastavení řezných podmínek na amplitudu samobuzených kmitů .....	24
Obrázek 10: Rám stroje z přírodní žuly .....	25
Obrázek 11: Uspořádání experimentu modální analýzy .....	25
Obrázek 12: Řez hydraulickým držákem nástrojů .....	26
Obrázek 13: Schéma vyvrtávací tyče Sandvik .....	27
Obrázek 14: Srovnání vyvrtávacích tyčí .....	27
Obrázek 15: Srovnání řezných sil při použití ACC .....	28
Obrázek 16: Srovnání běžné dráhy nástroje a trochoidální dráhy nástroje .....	29
Obrázek 17: Magnetické ložisko SKF .....	29
Obrázek 18: Diagram stability s vyznačenými optimálními otáčkami .....	30
Obrázek 19: Nastavení v programu Navi .....	31
Obrázek 20: Diagram stability v programu Navi .....	32



## 9 SEZNAM SYMBOLŮ

$b$	Šířka třísky
$c_1, c_2$	Koeficienty útlumu
$f$	Frekvence kmitů
$G(s)$	Přenosová funkce
$h$	Hloubka řezu
$k_1, k_2$	Tuhost pružiny
$K_f$	Řezný koeficient
$m$	Hmotnost
$P, F_c$	Řezná síla
$r$	Hloubkový koeficient
$s$	Kořeny rovnice
$v$	Rovnoměrná rychlost nástroje
$x_1, x_2$	Souřadnice
$\alpha, \beta$	Úhel
$\varphi$	Fázový posun
$\zeta_1, \zeta_2$	Poměry amplitud kmitů
$\omega$	Úhlová frekvence